



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 42 00 632 A 1

51 Int. Cl.⁵:
B 23 K 26/02

21 Aktenzeichen: P 42 00 632.5
22 Anmeldetag: 13. 1. 92
43 Offenlegungstag: 15. 7. 93

DE 42 00 632 A 1

71 Anm. Ider:

Maho AG, 8962 Pfronten, DE

74 Vertr. ter:

Be tz, R., Dipl.-Ing. Dr.-Ing.; Timpe, W., Dr.-Ing.;
Siegfried, J., Dipl.-Ing.; Schmitt-Fumian, W., Prof.
Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Mayr, C.,
Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte, 8000 München

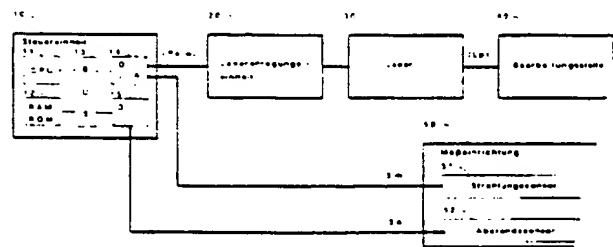
72 Erfinder:

Kuhl, Michael, 8958 Füssen, DE; Zwick, Alfred, 8951
Görisried, DE; Eberl, Günter, Dr., 8963 Waltherhofen,
DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren und Vorrichtung zum Bearbeiten von Werkstücken mittels der von einem Laser emittierten Laserstrahlung

57 Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Bearbeiten von Werkstücken mittels der von einem Laser emittierten Laserstrahlung, bei dem eine Bearbeitungsstelle (40) durch eine Meßeinrichtung (50) überwacht wird und die Bearbeitung von einer Steuereinheit (10) mit der Strahlungsleistung des Lasers (30) als Stellgröße entsprechend den von der Meßeinrichtung (50) ausgegebenen Signalen (Sa, Sm) geregelt wird. Erfindungsgemäß wird ein Signal (Sm) eines Strahlungssensors (51) und/oder ein Signal (Sa) eines Abstandssensors (52) von der Steuereinheit (10) erfaßt. Aus den Signalen (Sa, Sm) werden Steuerpulse (Pa, w, p) entsprechend aus den Signalen (Sa, Sm) ermittelten Soll-/Istwertabweichungen bestimmt, zur Ansteuerung des Lasers (30). Erfindungsgemäß wird weiterhin ein Ist-Laserpuls (Lp) von der Meßeinrichtung (50) gemessen und von der Steuereinheit (10) erfaßt und damit der darauf folgende Laserpuls (Lp) geregelt. Dadurch wird die Laserdynamik aus der Regelstrecke ausgekoppelt, wodurch die Reproduzierbarkeit der Laserpulse (Lp) erhöht wird. Zur Minimierung der Verzögerungszeit zwischen den Steuerpulsen (Pa, w, p) und den Laserpulsen (Lp) können zudem den Steuerpulsen (Pa, w, p) Vorimpulse (Pv) aufgeschaltet werden.



DE 42 00 632 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bearbeiten von Werkstücken mittels der von einem Laser emittierten Laserstrahlung, bei dem die Bearbeitungsstelle durch eine Meßeinrichtung überwacht wird und die Bearbeitung von einer Steuereinheit mit der Strahlungsleistung des Lasers als Stellgröße entsprechend den von der Meßeinrichtung ausgegebenen Signalen geregelt wird.

Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zum Bearbeiten von Werkstücken mittels der von einem Laser emittierten Laserstrahlung, mit einer Meßeinrichtung, einer Laseranregungseinheit und einer Steuereinheit.

Aus der DE 34 24 825 A1 ist ein Verfahren bekannt, bei dem die Laserintensität zwischen definierten Grenzwerten gehalten wird. Mit einem Strahlungssensor wird zum Beispiel die Intensität der Plasmaleuchtdichte fortlaufend erfaßt und die Laserintensität durch eine entsprechende Modulation der Laserstrahlung zur Aufrechterhaltung einer Plasmabildung unter Vermeidung einer unerwünschten Detonationswelle geregelt. Das Regelprinzip dieses Verfahrens basiert auf dem eines Zweipunktreglers, mit den bekannten Nachteilen, wie der Abhängigkeit der Grenzfrequenz des Reglers von der Zeitkonstante der Regelstrecke. Für ein feines Einstellen der Laserintensität zur Erzielung eines Feinabtrags von Werkstoff ist dieses Verfahren daher nicht geeignet.

Aus der DE 39 26 859 C2 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Schneiden oder Einlochen insbesondere metallischer Werkstücke mit Laserstrahlung bekannt. Hierbei wird die Bearbeitungsstelle des Werkstücks mit einem Strahlungssensor überwacht, der die herrschende Werkstücktemperatur durch Erfassen der Wärmestrahlung mißt. Es ist ein Zweipunktregler beschrieben, der bei Erreichen einer oberen Werkstücktemperatur die Laserstrahlung abschaltet und bei Erreichen einer unteren Werkstücktemperatur die Laserstrahlung wieder einschaltet. Der Laser wird daher durch das Erreichen der oberen und der unteren Werkstücktemperatur gepulst.

Es ist bekannt, daß Laser eine gewisse Zeit von deren Anregung bis zur Emittierung von Laserstrahlung benötigen. Dies gilt für Festkörperlaser (z. B. einem ND:YAG-Laser) ebenso wie für Gaslaser (z. B. einen CO₂-Laser). Bei Festkörperlasern ist die Verzögerungszeit noch um ca. eine Zehnerpotenz höher. Weiterhin pumpt der Laser nach dem Ausschalten noch Laserstrahlung nach. Durch diese spezifischen Zeitkonstanten des Lasers, die sich zudem mit der Pulsfrequenz des Lasers ändern, wird die Grenzfrequenz des Zweipunktreglers gemäß der DE 39 26 859 C2 bestimmt. Die Grenzfrequenz der Laserpulse kann daher nicht über einen bestimmten Wert gehoben werden, da sich sonst die Laserpulse überschneiden und dadurch das minimale Energieniveau der Bearbeitung angehoben würde. Durch die laserspezifischen Zeitkonstanten bei Anwendung eines Zweipunktreglers für die Regelung von Laserstrahlung muß daher mit einer niedrigen Grenzfrequenz gefahren werden, was zu relativ großen Leistungspulsen führt. Dadurch kann ein bestimmter Grenzabtrag an Material bei der Vorschubbewegung des Lasers über das Material in einer Schicht nicht unterschritten werden.

Bei Auftreffen der Laserstrahlung auf das Material kommt es zu einer Temperaturerhöhung innerhalb ei-

ner sehr kurzen Zeitspanne, die im Nanosekunden-Bereich angesiedelt ist. Die Steuergröße einer Laserregelung, zum Beispiel die Strahlungsleistung, muß zumindest gleich schnell reagieren. Ist dies nicht der Fall, so wird ein solches Regelsystem instabil.

Die Dynamik des Lasers, d. h. die systembedingte Ansprechzeit und das Nachpumpen der Laserstrahlung nach dem Ausschalten, ist bei einer Zweipunktregelung gemäß der DE 39 26 859 C2, welche die Strahlung eines Pulses erfaßt und denselben Puls mit dem erfaßten Signal regelt, in der Regelstrecke wirksam, was zu nicht genau reproduzierbaren Laserpulsen führt. Für einen Feinabtrag von Material ist daher eine Regelung, die die Zeitkonstanten des Lasers in der Regelstrecke enthält, nicht geeignet.

Weiterhin ist die Eigendynamik von Lasern nur bei Pulsfrequenzen annähernd konstant, deren Änderungen innerhalb bestimmter, sehr enger Grenzen liegen. Wird nun ein sich selbst pulsender Laser verwendet, so ändert sich ständig die Frequenz der Laserpulse. Damit variieren die Ansprechzeiten der Laserstrahlung auf Anregungspulse, wodurch ein genaues Abtragen mit sehr geringen Abtragstiefen, z. B. 1 µm, unmöglich werden.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Bearbeiten von Werkstücken mittels der von einem Laser emittierten Laserstrahlung zu realisieren, die einen vergrößerten Materialabtrag ebenso wie einen reproduzierbaren Feinabtrag von Material bei einer hohen Oberflächengüte ermöglichen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren gelöst, bei dem ein Ist-Abstand zwischen einem Bezugspunkt und der Oberfläche der Wechselwirkungszone der Bearbeitungsstelle ermittelt wird, eine Soll-/Istwertabweichung zwischen einem vorgegebenen Soll-Abstand und dem erfaßten Ist-Abstand ermittelt wird, amplituden-, pulsweiten- und/oder frequenzmodulierte Steuerpulse entsprechend der Soll-/Istwertabweichung ermittelt werden, die ermittelten Steuerpulse an eine Laseranregungseinheit ausgegeben werden und den Steuerpulsen entsprechende Laserpulse durch den durch die Laseranregungseinheit angesteuerten Laser ausgegeben werden, zum Bearbeiten des Werkstücks.

Durch die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren erzeugten Steuerpulse kann die Anregung des Lasers im wesentlichen ohne eine Beeinflussung durch Zeitkonstanten geändert werden. Eine Zeitkonstante ist hierbei z. B. die Zeitdauer zwischen der ansteigenden Flanke eines an die Laseranregungseinheit ausgegebenen Steuerpulses und dem Einsetzen des Laserpulses und damit der Laserstrahlung. Dadurch wird eine hohe zeitliche Reproduzierbarkeit der Laserpulse erreicht, wodurch die Strahlungsleistung sehr genau gesteuert werden kann. In vorteilhafter Weise können dadurch sehr feine Materialschichten reproduzierbar und mit konstanter Dicke abgetragen werden.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich zur Ermittlung des Ist-Abstandes und der Bestimmung der Soll-/Istwertabweichung mit dem Signal eines Strahlungssensors der Meßeinrichtung die Prozeßstrahlung der Bearbeitungsstelle erfaßt und daraus eine Bearbeitungstiefe ermittelt wird, die dem Abstand zwischen der Oberfläche der Wechselwirkungszone und einer Bodenlinie entspricht, eine Bearbeitungstiefenabweichung aus der Bearbeitungstiefe und der Soll-/Istwertabweichung ermittelt wird und Steuerpulse entsprechend der Bearbeitungstiefenabweichung zur Ausgabe an die den Laser ansteuernde Laseranregungseinheit ermittelt werden.

Durch die Kombination der Erfassung des Abstandes von einem Bezugspunkt zu der Oberfläche der Bearbeitungsstelle und der Tiefe der Bearbeitungsstelle (Wechselwirkungszone) kann die reale Bearbeitungstiefe für jede Abtragsschicht am Material während des Abtrags der Schicht bestimmt werden. Dadurch enthält die Regelgröße einen realen Prozeßparameter, der die umgewandelte, aufgeschmolzene und verbrannte Werkstoffmenge an der Bearbeitungsstelle berücksichtigt. Durch den Strahlungssensor wird die von der Wechselwirkungszone emittierte Wärmestrahlung und damit ein Wert, der mit dem Volumen der Wechselwirkungszone in Verbindung gebracht werden kann, ermittelt. Der Strahlungssensor liefert ein Signal für die Ist-Abtragsmenge der Bearbeitung. Durch die Kombination der Messung der absoluten Tiefe (Bearbeitungstiefe) der Bearbeitungsstelle und dem relativen Abstandssignal können während der Bearbeitung in einer Abtragsschicht Einflüsse wie Änderungen der Bearbeitungstemperatur, Änderung der Strömungsverhältnisse, Änderung der Materialzusammensetzungen, usw., erfaßt werden. Zudem wird eine sehr genaue Steuerung der Laserleistung möglich.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung werden die Signale des Abstandssensors und/oder des Strahlungssensors während der Ausgabe eines Laserpulses erfaßt und damit Steuerpulse für mindestens einen nachfolgenden Laserpuls erzeugt. Die Erfassung der Regelgrößen und die Ermittlung der Steuerpulse ist damit von der Ausgabe der Steuerpulse entkoppelt. Dadurch wird die Eigendynamik des Lasers aus dem Regelkreis ausgekoppelt und ist nicht mehr in dem Übertragungsglied der Regelung und damit in der Regelstrecke enthalten. Da die Frequenz der Steuerpulse nur in bestimmten Grenzen geändert wird, ist auch die Eigendynamik des Lasers annähernd konstant. Dadurch kann eine in hohem Maße reproduzierbare Strahlungsleistung des Lasers erzeugt werden, die für den Abtrag von definierten Materialschichten von geringer Dicke notwendig ist.

In weiteren vorteilhaften Ausführungsformen der Erfindung wird der Ist-Abstand und/oder die Bearbeitungstiefe über eine Gruppe von Laserpulsen erfaßt und anschließend gemittelt. Dadurch können z. B. durch elektrische Störungen hervorgerufene Schwankungen in den erfaßten Signalen ausgeglichen werden. Diese Schwankungen können durch elektromagnetische Felder hervorgerufen werden, die auf die Übertragungsleitungen der Sensoren einwirken. Weiterhin kann dadurch die Erfassung der Meßsignale an die Rechenleistung der Steuereinheit angepaßt werden.

Darüber hinaus kann zu Beginn der Bearbeitung ein erster Steuerpuls vorgegeben werden. Dies ist vorteilhaft, da zu Beginn der Bearbeitung noch kein Laserpuls auf das Werkstück aufgebracht wurde, so daß die Regelgröße keine Informationen über den Prozeßzustand enthält.

Des weiteren kann bei der linienförmigen Materialabtragung in mehreren aufeinanderfolgenden Schichten, z. B. zur Herstellung von Hohlräumen in massiven Werkstücken, am Anfang einer neuen Abtragsschicht der gemessene Ist-Abstand mit dem Soll-Abstand der letzten Abtragsschicht verglichen werden. Dadurch wird in vorteilhafter Weise eine Differenz zwischen der real erzielten Abtragtiefe während der letzten Bearbeitungsschicht und der eingestellten Soll-Abtragstiefe der letzten Abtragsschicht erhalten. Diese Differenz kann als Korrekturbetrag oder -faktor für die Regelung von wei-

teren Abtragsschichten verwendet werden. Durch diese Korrektur kann eine Abtragstiefenabweichung ausgeglichen werden, die sich — ohne Korrektur — von Bearbeitungsschicht zu Bearbeitungsschicht addiert. Dadurch kann eine beträchtliche Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit erreicht werden.

Zur Ermittlung der Steuerpulse, die als Stellgrößen des Bearbeitungsprozesses die Strahlungsleistung des Lasers direkt beeinflussen, können auch n-te Ableitungen der Soll-/Istwertabweichung und/oder der Bearbeitungstiefenabweichung ermittelt werden. Dadurch können schnellere und genauere Systemantworten auf Änderungen der Eingangsgrößen erzielt werden.

Die Steuerpulse zur Ansteuerung der Laseranregungseinheit können aus der Soll-/Istwertabweichung, der Bearbeitungstiefenabweichung oder der Abstandsdifferenz berechnet werden. Zur Verringerung der Rechenzeit kann es aber auch von Vorteil sein, die Steuerpulse aus einer Matrix auszulesen. Die Steuerpulse sind in dieser Weiterbildung der Erfindung fest abgespeichert und können als Funktion der Soll-/Istwertabweichung, der Bearbeitungstiefenabweichung oder der Abstandsdifferenz aus der Matrix aus einem Speicher der Steuereinheit ausgelesen werden. Die Steuerpulse sind hierbei unter vergleichbaren Bedingungen während Versuchsbearbeitungen ermittelt und abgespeichert worden.

Die Steuerpulse können als Absolutwerte berechnet oder aus einer Matrix ausgelesen werden. Zur Verringerung der Rechenzeit kann es von Vorteil sein, die Steuerpulse nicht als Absolutwerte zu berechnen, sondern nur deren Inkrement oder Dekrement zu ermitteln. Die erforderliche Rechenzeit für das Addieren eines kleinen Inkrements oder das Subtrahieren eines kleinen Dekrements, jeweils im Vergleich zu dem Absolutwert, ist aufgrund der kleineren erforderlichen Bit-Anzahl der in der Recheneinheit vorliegenden Variablen im Vergleich zur Verarbeitung der absoluten Steuerpulse geringer.

Die aufgrund der Steuerpulse erzeugten Laserpulse sind systembedingt und frequenzabhängig zu den Steuerpulsen zeitverzögert. Wird ein CO₂-Laser zum Beispiel mit 10 kHz-Steuerpulsen angesteuert, so beträgt die Zeitkonstante zwischen dem Steuerpuls und dem zugehörigen Laserpuls z. B. ca. 15 Mikrosekunden. Das Einsetzen des Laserpulses besitzt eine Schwankungsbreite von z. B. ca. ± 2 Mikrosekunden. Diese zeitliche Schwankungsbreite des Einsetzens des Laserlichts wird als Jitter bezeichnet. Dieser Jitter kann dadurch gesenkt werden, daß dem Steuerpuls ein Vorimpuls aufgeschaltet wird. Dieser Vorimpuls, dessen Fläche nicht von den Regelgrößen beeinflußt wird, besitzt eine im Vergleich zu den Steuerpulsen überhöhte Amplitude und eine im Vergleich zu den Steuerpulsen geringere Pulsweite. Das Einsetzen des Vorimpulses ist so gesteuert, daß sich die ansteigende Flanke des Vorimpulses mit der ansteigenden Flanke des Steuerpulses deckt. Zudem wird durch den Vorimpuls auch die Ansprechzeit, d. h. die Zeitkonstante zwischen dem Steuerpuls und dem dazugehörigen Laserpuls, verringert. Bei 10 kHz-Laserpulsen eines CO₂-Lasers können mit Vorimpuls Ansprechzeiten von z. B. 3 Mikrosekunden und einem Jitter von z. B. ± 1 Mikrosekunden erhalten werden. Durch die Anwendung des Vorimpulses wird in vorteilhafter Weise die mögliche Änderung der Pulsfrequenz bzw. der Pulspausen zwischen aufeinanderfolgenden Laserpulsen zur Änderung der Stellgröße Laserleistung vergrößert, ohne das Ansprechen der Laserpulse auf die Steuerpulse so stark zu ändern, daß der gewünschte reproduzierba-

re Feinabtrag nicht mehr gewährleistet ist. Diese Pulsfrequenzänderung bei Aufschaltung eines Vorimpulses liegt vorzugsweise bei z. B. ca. 10 ± 2 kHz für einen gepulsten CO₂-Laser.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird die benötigte Einschaltzeit des Lasers verringert und zeitdiskreter realisiert. Dazu wird der Laser durch Simmern unterhalb der Laserschwelle durch Glimmentladungen etwa auf Betriebstemperatur gehalten, die für ein Arbeiten des Lasers erforderlich ist. Die durch das Simmern eingebrachte Energie liegt knapp unterhalb der Energie, die nötig wäre, den Laser über die Laserschwelle zu heben. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn zur Herstellung besonderer Konturen im Werkstück das Material nur bereichsweise abgetragen wird. Hierbei wird das Werkstück oder der Laserkopf kontinuierlich während eines Arbeitsgangs bewegt und der Laser wird durch Simmern in einem angeregten Zustand gehalten, wenn bestimmte Werkstückbereiche überfahren werden, in denen keine Bearbeitung erfolgen soll. Während der Bearbeitung zwischen den einzelnen Laserpulsen wird ein Simmern nicht angewandt, da sich der Laser ohnehin in seinem Betriebszustand befindet. Durch Simmern wird gewährleistet, daß der erste Steuerpuls auch einen Laserpuls verursacht.

Die Aufgabe wird weiterhin durch eine Vorrichtung zum Bearbeiten von Werkstücken mittels der von einem Laser emittierten Laserstrahlung gelöst, die dadurch gekennzeichnet ist, daß die Meßeinrichtung einen Abstandssensor und die Steuereinheit elektronische Schaltkreise gemäß Patentanspruch 12 aufweist.

In weiteren vorteilhaften Ausgestaltungen der Erfindung weist die Meßeinrichtung einen Strahlungssensor auf, mit dessen Signal eine Bearbeitungstiefe ermittelt wird.

Einer der wesentlichen Vorzüge der Erfindung liegt darin, daß die Eigendynamik des Lasers aus dem Regelkreis der Regelung ausgekoppelt werden kann und nicht in dem Übertragungsglied enthalten ist. Dadurch kann ein Ist-Laserpuls gemessen und der nächste Laserpuls oder folgende Laserpulse entsprechend geregelt werden (im Gegensatz zur Regelung des gemessenen Ist-Laserpulses). Weiterhin wird die Eigendynamik des Lasers durch eine sich nur in bestimmten Grenzen ändernde Pulsfrequenz und die Aufschaltung eines Vorimpulses auf den Steuerpuls annähernd konstant gehalten. Darüber hinaus kann die Ansprechzeit zwischen einem Steuerpuls und dem dazugehörigen Laserpuls durch Simmern und Aufschaltung eines Vorimpulses verringert werden. Dadurch verstreicht zwischen einer Laseranregung und einer Emittierung von Laserlicht ein minimierter Zeitraum und die Schwankungsbreite des Einsetzens des Laserlichts (Jitter) wird verringert.

Weiterhin wird durch die Erfindung eine sehr hohe Puls-zu-Puls-Stabilität durch die Verringerung der Streubreite der Laserpulse erreicht.

Ein weiterer wesentlicher Vorzug der Erfindung liegt darin, daß eine dreidimensionale Ansteuerung des Lasers möglich wird. Durch die Ermittlung des Abstands zwischen einem Bezugspunkt und der Oberfläche der Bearbeitungsstelle kann die Laserstrahlung zu einem in einer Ebene liegenden geometrisch genau definierten Ort gesteuert werden. Durch Hinzunahme der Erfassung der Bearbeitungstiefe als Regelgröße geht auch die "Einwirktiefe" der Laserstrahlung in die Regelung ein. Damit ist eine außerordentlich genaue Ansteuerung des Lasers möglich, die für den Feinabtrag von Material von Vorteil ist.

Weitere Vorzüge und Besonderheiten der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnungen. Es zeigen:

Fig. 1 ein schematisches Blockschaltbild einer Laserabtragsvorrichtung;

Fig. 2 eine schematische Darstellung der Bearbeitungsstelle;

Fig. 3 ein Flußdiagramm zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 4 ein Flußdiagramm einer weiteren Ausführungsform zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 5 ein zeitliches Ablaufdiagramm mit Steuerpulsen und dazugehörigen Laserpulsen.

Das schematische Blockschaltbild gemäß Fig. 1 zeigt eine Steuereinheit 10 mit einer CPU (central processing unit) 11, einem Speicher 12 mit RAM (random access memory) und ROM (read only memory), einem Adreß- und Datenbus 13, einem D/A (digital/analog)-Wandler (A/D (analog/digital)-Wandler) und einer I/O (input/output)-Einheit 15. Nicht dargestellt sind in dieser schematischen Darstellung die Ein- und Ausgabeeinheiten für die Steuereinheit, wie z. B. eine Tastatur, ein Bildschirm und ein Drucker. Weiterhin kann die Steuereinheit 10 an die Programmsteuerung einer CNC-Maschine angeschlossen werden und mit einem LAN (local area network) und/oder einem WAN (wide area network) verbunden sein, zur Integration in eine CIM (computer integrated manufacturing)-Fertigung. Die Steuereinheit gibt über den D/A-Wandler 14 Steuerpulse Pa,w,p an eine Laseranregungseinheit 20 aus, zur Ansteuerung eines Lasers 30. Die Laseranregungseinheit 20 kann zum Beispiel ein HF-Generator sein, der direkt mit Laserelektroden des Lasers 30 verbunden ist und dort eine Glimmentladung erzeugt. Der Laser 30 kann ein Festkörper oder ein Gaslaser sein, der in der Regel gepulst betrieben wird. Vorzugsweise wird zur Materialabtragung ein CO₂-Laser verwendet.

Der Laser 30 gibt über die Steuerpulse Pa,w,p und angesteuert durch die Laseranregungseinheit 20 Laserpulse Lp aus. Diese Laserpulse Lp werden durch eine nicht dargestellte Optik auf eine Bearbeitungsstelle 40 gerichtet. Die Bearbeitungsstelle 40 wird durch eine Meßeinrichtung 50 überwacht. Die Meßeinrichtung 50 enthält einen Abstandssensor 52 und ggf. zusätzlich einen Strahlungssensor 51.

Durch den Strahlungssensor 51 kann zum Beispiel die Wärmestrahlung der Wechselwirkungszone zwischen der Laserstrahlung und dem bearbeiteten Material, d. h. der Bearbeitungsstelle 40 im Werkstück, erfaßt werden. Aus einem durch die Steuereinheit 10 von dem A/D-Wandler 14 erfaßten Signal Sm des Strahlungssensors 51 kann z. B. auf die Größe der Wechselwirkungszone geschlossen werden. Dadurch kann ein der Tiefe der Wechselwirkungszone entsprechender Wert ermittelt werden.

Der Abstandssensor 52 ermittelt den Abstand zwischen einem festen Bezugspunkt 44 und der Oberfläche 45 der Bearbeitungsstelle 40. Ein Signal Sa des Abstandssensors 52 wird von der Steuereinheit 10 über die I/O-Einheit 15 erfaßt.

In Fig. 2 ist ein Abtragsvorgang in einem Werkstück 41 schematisch dargestellt. Ein Laserstrahl 42 und ggf. ein Hilfsgas treffen in dieser beispielhaften Darstellung senkrecht auf die Oberfläche 45 des Werkstücks 41 unter Bildung einer Bearbeitungsstelle 40 auf. Die relative Vorschubrichtung zwischen Werkstück 41 und Laserstrahl 42 ist durch den Pfeil 43 angegeben. Zwischen

einem Bezugsort 44, z. B. an einem Laserkopf 47, und der Oberfläche 45 der Bearbeitungsstelle 40 ist ein Ist-Abstand A_{ist} eingezeichnet, der vom Abstandssensor 52 gemessen wird. Des weiteren ist zwischen der Oberfläche 45 der Bearbeitungsstelle 40 und einer Bodenlinie 46 eine Bearbeitungstiefe B_{ist} eingezeichnet, die über den Strahlungssensor 51 ermittelt werden kann. Der Strahlungssensor 51 und der Abstandssensor 52 können an der Laserstrahlungsachse oder an einem anderen geometrischen Ort angeordnet sein (nicht dargestellt).

In dem schematischen Flußdiagramm des Verfahrens gemäß der Ausführungsform nach Fig. 3 ist ein von der Steuereinheit 10 durchgeführter Programmablauf dargestellt. Dieser Programmablauf ist zum Beispiel im RAM oder im ROM an einer definierten Adresse gespeichert und kann z. B. von einem Bediener oder CNC-gesteuert aufgerufen werden. Beim ersten Programmdurchlauf wird zum Start (Schritt 100) ein Durchlaufzähler z zu Null gesetzt. Da im ersten Programmdurchlauf die Regelgrößen A_{ist} und/oder B_{ist} Null oder fehlerhaft sein können, wird im Schritt 101 ermittelt, ob dieser erste Programmdurchlauf vorliegt. Wenn das der Fall ist, werden für die Pulsamplitude, die Pulsweite und die Pulspause vorgespeicherte Werte Pa_1 , Pw_1 , Pp_1 verwendet (Schritt 102). Anschließend wird der Durchlaufzähler z auf 1 gesetzt (Schritt 103) und es erfolgt eine Verzweigung zu Schritt 119. In Schritt 120 wird dann entweder das Programm beendet oder es wird zurück zu Schritt 101 verzweigt. Beim nächsten Programmdurchlauf wird aus dem Signal S_a des Abstandssensors 52 der Abstand A_{ist} ermittelt (Schritt 104). Der Abstand A_{ist} kann bei jedem Programmdurchlauf im Schritt 104 berechnet oder auch aus einer Matrix ausgelesen werden. Darauf folgend wird ermittelt, ob der Ist-Durchlauf der erste Durchlauf einer neuen Abtragschicht ist (Schritt 105). Sofern dies der Fall ist, wird eine Abstandsdifferenz (ΔA_k) gebildet, die der Differenz zwischen dem Soll-Abstand der letzten Abtragschicht $A_{soll\ k-1}$ und dem in Schritt 104 erfaßten Ist-Abstand $A_{ist\ k}$ entspricht (Schritte 106–108).

Ist dieser Durchlauf nicht der erste Durchlauf einer neuen Abtragschicht, so wird direkt zu Schritt 109 verzweigt. Dort wird zur Bildung einer Soll-/Istwertabweichung ΔA_i die Differenz zwischen einem Soll-Abstand A_{soll} und dem Ist-Abstand A_{ist} gebildet (Schritt 109). Der Soll-Abstand A_{soll} kann z. B. als fest abgespeicherter Wert vorliegen, von einem Bediener eingegeben werden oder über eine CNC-Steuerung übermittelt werden. Weiterhin können die Soll-/Istwertabweichungen ΔA_i für jeden Durchlauf berechnet oder aus einer Matrix ausgelesen werden.

Nach der Ermittlung der Soll-/Istwertabweichung ΔA_i werden die Steuerpulse Pa, w, p in Abhängigkeit der Soll-/Istwertabweichung ΔA_i ermittelt (Schritte 110–119).

Die Steuerpulse Pa, w, p weisen eine definierte Amplitude, Pulsweite und Pulspause auf. Die Pulsamplitudenanteile Pa , die Pulsweitenanteile Pw und die Pulspausenanteile Pp der Steuerpulse Pa, w, p werden in diesem Ausführungsbeispiel getrennt ermittelt. Die Ermittlung kann aber auch zusammengefaßt werden, wobei eine Kenngröße ermittelt wird, die die Pulsamplitude, die Pulsweite und die Pulspause der Steuerpulse Pa, w, p charakterisiert. Wird in Schritt 110 zu Schritt 112 verzweigt, so wird die Pulsweite des Steuerpulses Pa, w, p nicht verändert, und es wird für den nächsten Steuerpuls Pa, w, p der vorherige Wert der Pulsweite verwendet. Soll dagegen eine Pulsweitenmodulation vorgenommen

werden, so wird zu Schritt 111 verzweigt. In Schritt 111 kann die nächste Pulsweite Pw_{i+1} als Funktion der Abstandsdifferenz ΔA_k (Korrekturfaktor) und der Soll-/Istwertabweichung ΔA_i ermittelt werden. In den Schritten 113–115 wird ermittelt, ob die Pulsamplitude des Steuerpulses Pa, w, p geändert werden soll. Ist dies der Fall, so wird zu Schritt 114 verzweigt, in dem die Pulsamplitude Pa_{i+1} für den nächsten Steuerpuls Pa, w, p als eine Funktion der Abstandsdifferenz ΔA_k und der Soll-/Istwertabweichung ΔA_i ermittelt werden kann. Ist dies nicht der Fall, so wird für die nächste Pulsamplitude die vorherige Pulsamplitude übernommen (Schritt 115). Im Schritt 116 wird ermittelt, ob eine Pulspause und damit die Pulsrepetitionrate (Pulsfrequenz) moduliert werden soll, was in Schritt 117 durchgeführt wird, wobei in Schritt 118 der vorhergehende Wert für den nächsten Pulspausenanteil Pp_{i+1} gesetzt wird. In Schritt 119 werden dann die Anteile der Pulsamplitude, der Pulsweite und der Pulspause zu dem endgültigen Steuerpuls Pa, w, p zusammengesetzt. In den Schritten 111, 114 und/oder 117 können die Pulsweiten-, die Pulsamplituden und die Pulspausenanteile der Steuerpulse Pa, w, p auch aus Matrizen ermittelt werden. Diese Matrizen können vorgespeicherte Werte der Pulsweiten-, der Pulsamplituden- und der Pulspausenanteile der Steuerpulse Pa, w, p in Abhängigkeit von mindestens der Soll-/Istwertabweichung ΔA_i enthalten. Zudem kann als weitere Dimension ein Korrekturfaktor, z. B. die Abstandsdifferenz ΔA_k für die Matrix verwendet werden. In den Schritten 111, 114 und/oder 117 wird jeweils der Absolutwert der Steuerpulsanteile ermittelt. Es können aber auch Inkremente oder Dekremente ermittelt werden, die dann jeweils zu vorhandenen Absolutwerten addiert bzw. subtrahiert werden. In Schritt 120 wird dann zu Schritt 100 verzweigt (nicht dargestellt) oder der Programmablauf wird abgebrochen.

Fig. 4 zeigt ein weiteres Flußdiagramm für eine andere Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens. Im folgenden wird auf Funktionsblöcke, die zu den unter Fig. 3 beschriebenen identisch sind, nicht mehr eingegangen. In einem Schritt 205 wird die Bearbeitungstiefe B_{ist} als eine Funktion des Signals S_m des Strahlungssensors 51 ermittelt. Die Bearbeitungstiefe B_{ist} kann auch aus einer Matrix ausgelesen werden. Daraufhin wird in Schritt 206 die Soll-/Istwertabweichung ΔA_i aus einer Differenz des Soll-Abstands A_{soll} und des Ist-Abstands A_{ist} ermittelt. In Schritt 207 wird dann aus einer Differenz der in Schritt 206 ermittelten Soll-/Istwertabweichung ΔA_i und der Bearbeitungstiefe B_{ist} eine Bearbeitungstiefenabweichung ΔB_i ermittelt. In dem Fall, daß die Bearbeitungstiefenabweichung ΔB_i einen Wert ungleich Null (oder größer als ein Grenzwert) annimmt, so ist eine Änderung der Strahlungsleistung des Lasers 30 nötig, da die Abtragschicht zu tief oder zu flach abgetragen wird. Wird jedoch die Bearbeitungstiefenabweichung ΔB_i zu Null (oder kleiner als ein Grenzwert) ermittelt, so wird der Steuerpuls Pa, w, p nicht geändert (Schritte 209, 210, 211). In einem Schritt 213 wird ein Pulsweiteninkrement oder -decrement für den nächsten Puls ΔPw_{i+1} als Funktion der Bearbeitungstiefenabweichung ΔB_i ermittelt. ΔPw_{i+1} kann auch aus einer Matrix ausgelesen werden. In einem Schritt 215 wird dann der Absolutwert des Pulsweitenanteils Pw_{i+1} für den nächsten Steuerpuls additiv aus dem Pulsweitenanteil des letzten Pulses und dem Inkrement oder Dekrement ermittelt. Anstatt der Ermittlung der Inkremente bzw. Dekremente (Schritte 213, 215) kann auch der Absolutwert des Pulsweitenanteils Pw_{i+1}

ermittelt werden. Die Ermittlung kann durch eine Berechnung und/oder durch ein Auslesen aus einer Matrix erfolgen.

Die Schritte 216 bis 223 sind mit den Schritten 212 bis 215 nur dadurch unterschiedlich, daß in den Schritten 216 bis 219 die Pulsamplitudenanteile und in den Schritten 220—223 die Pulspausenanteile der Steuerpulse Pa,w,p ermittelt werden, so daß das oben Beschriebene auch für diese Schritte gilt.

In einem Schritt 224 werden dann die Pulsamplituden-, die Pulsweiten- und die Pulspausenanteile zu dem Steuerpuls Pa,w,p zusammengesetzt. In einem Schritt 225 wird anschließend zum Start (Schritt 200) (nicht dargestellt) verzweigt oder der Programmablauf wird abgebrochen.

Die Entscheidung, ob eine Pulsweitenmodulation, eine Pulsamplitudenmodulation und/oder eine Pulspausenmodulation (Schritte 111, 114, 117) vorgenommen werden sollen, kann durch den Bediener vorgenommen werden. Die Verzweigungsentscheidungen können auch über einen nicht dargestellten Unterprogrammablauf in Abhängigkeit von voreingestellten oder ermittelten Prozeßparametern getroffen werden.

In Fig. 5 sind beispielhaft vier verschiedene Steuerpulse Pa,w,p und die dazugehörigen Laserpulse Lp in einem zeitlichen Ablaufdiagramm dargestellt. Die Steuerpulse Pa,w,p werden von der Steuereinheit 10 generiert worden, wobei der Laser 30 die Laserpulse Lp mit einer systembedingten Verzögerung t_1 , t_2 (Ansprechzeit, Zeitkonstante) ausgibt. Die Ansprechzeit t_1 , t_2 ist z. B. abhängig von der Pulsfrequenz aufeinanderfolgender Steuerpulse Pa,w,p, dem Betriebszustand des Lasers und der Pulsform der Steuerpulse Pa,w,p. In dieser Darstellung wird zum Zeitpunkt T_1 ein Steuerpuls Pa,w,p in Form eines Rechtecksignals generiert. Dieser Steuerpuls Pa,w,p verursacht einen Laserpuls Lp, der um t_1 zeitverzögert ausgegeben wird.

Wird nun dem Steuerpuls Pa,w,p zum Zeitpunkt T_2 ein Vorimpuls Pv aufgeschaltet, so ergibt sich eine Zeitverzögerung t_2 des Laserpulses Lp, für die $t_1 > t_2$ gilt. Durch den Vorimpuls wird somit die Ansprechzeit der Laserpulse verkürzt. Dadurch ist es möglich, auch die Pulspause in bestimmten Grenzen zu variieren, ohne die Reproduzierbarkeit der Laserpulse im Hinblick auf einen Feinabtrag von Material zu stark zu beeinflussen.

Die Strahlungsleistung des Lasers 30 kann durch eine Puls-zu-Puls-Änderung der Pulsamplitude ΔPa , der Pulsweite ΔPw und der Pulspause ΔPp der Steuerpulse Pa,w,p geändert werden. Zum Zeitpunkt T_3 weist der Steuerpuls Pa,w,p im Vergleich zum Steuerpuls Pa,w,p zum Zeitpunkt T_2 eine um ΔPw größere Pulsweite auf, wodurch der Steuerpuls Pa,w,p eine vergrößerte Fläche besitzt und damit der Laser 30 einen T_4 ist im Vergleich zum Zeitpunkt T_2 die Pulsamplitude um ΔPa vergrößert und der Steuerpuls setzt um ΔPp früher ein. Durch die Erhöhung der Pulsamplitude um ΔPa vergrößert sich wiederum die dem Steuerpuls Pa,w,p entsprechende Leistung des zugehörigen Laserpulses Lp. Durch das Versetzen des Steuerpulses um ΔPp steigt die mittlere Energiedichte der Laserpulse Lp, sofern die Fläche der Steuerpulse in dem betrachteten Zeitraum konstant gehalten oder zumindest nicht verkleinert wird.

Durch den Vorimpuls Pv wird weiterhin der Jitter verringert, was zu einer Optimierung der Reproduzierbarkeit der Laserpulse Lp beiträgt. Mit einer optimierten Reproduzierbarkeit der Laserpulse Lp erhöht sich auch die Feinheit der Regelung und damit die Genauigkeit der abgetragenen Werkstoffschichten, wodurch die

Tiefe der jeweilig abgetragenen Schicht minimiert werden kann. Zudem kann die Bearbeitungsgüte, d. h. die Bearbeitungsrauigkeit, durch eine Optimierung der Reproduzierbarkeit der Laserpulse Lp und der Möglichkeit einer Reduzierung der Laserleistung erhöht werden.

Außerdem kann zum Überfahren bestimmter Werkstückbereiche für eine fliegende Bearbeitung (intermittierende Bearbeitung) der Werkstücke das Sintern des Lasers eingesetzt werden. Das Sintern wird zugeschaltet, wenn der Laser längere Zeit ausgeschaltet wird, und es wird z. B. erst in dem Moment ausgeschaltet, in dem der erste Laserpuls generiert wird, d. h. das Sintern wird an der ansteigenden Flanke des Laserpulses abgeschaltet. Durch das Sintern kann die Zeitverzögerung t_1 , t_2 ebenfalls verringert werden, wenn der Laser längere Zeit ausgeschaltet war (fliegende Bearbeitung).

Zur Ermittlung der Soll-/Istwertabweichung ΔA_i und/oder der Bearbeitungstiefenabweichung ΔB_i können anstatt der Differenzenbildung auch n-te Ableitungen der Differenzen zu deren Ermittlung eingesetzt werden. Außerdem können Regelalgorithmen zur Ermittlung der Soll-/Istwertabweichung ΔA_i und der Bearbeitungstiefenabweichung ΔB_i verwendet werden (z. B. P-, I-, PI-, PID-Regelalgorithmen). Der Vorteil der Anwendung von Regelalgorithmen liegt in einem schnelleren Ansprechen der Stellgröße Strahlungsleistung (bzw. der Steuerpulse) auf die von der Meßeinrichtung erfaßten Regelgrößen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bearbeiten von Werkstücken (41) mittels der von einem Laser (30) emittierten Laserstrahlung, bei dem eine Bearbeitungsstelle (40) durch eine Meßeinrichtung (50) überwacht und die Bearbeitung von einer Steuereinheit (10) mit der Strahlungsleistung des Lasers (30) als Stellgröße entsprechend den von der Meßeinrichtung (50) ausgegebenen Signalen (S_a , S_m) geregelt wird, gekennzeichnet durch folgende Schritte:

A) Ermittlung eines Ist-Abstands (A_{ist}) zwischen einem Bezugspunkt (44) und der Oberfläche (45) der Bearbeitungsstelle (40) (Schritt 104),

B) Ermittlung (Schritt 109) einer Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i) zwischen einem vorgegebenen Soll-Abstand (A_{soll}) und dem erfaßten Ist-Abstand (A_{ist}),

C) Ermittlung (Schritte 110—119) von amplituden-, pulsweiten- und/oder frequenzmodulierten Steuerpulsen (Pa,w,p) entsprechend der Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i),

D) Ausgabe der ermittelten Steuerpulse (Pa,w,p) an eine Laseranregungseinheit (20), und

E) Ausgabe von den Steuerpulsen (Pa,w,p) entsprechenden Laserpulsen (Lp) durch den durch die Laseranregungseinheit (20) angesteuerten Laser (30), zum Bearbeiten des Werkstücks (41).

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß

— zusätzlich zur Ermittlung des Ist-Abstandes (A_{ist}) (Schritt 204) und der Bestimmung der Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i) (Schritt 206) mit dem Signal (S_m) eines Strahlungssensors (52) der Meßeinrichtung (50) die Prozeßstrah-

lung der Bearbeitungsstelle (40) erfaßt und daraus eine Bearbeitungstiefe ($B_{t_{ist}}$) (Schritt 205) ermittelt wird, die dem Abstand zwischen der Oberfläche (45) der Bearbeitungsstelle (40) und einer Bodenlinie (46) entspricht.

— eine Bearbeitungstiefenabweichung (ΔB_{ti}) aus der Bearbeitungstiefe ($B_{t_{ist}}$) und der Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i) ermittelt wird (Schritt 207) und

— Steuerpulse (Pa.w.p) entsprechend der Bearbeitungstiefenabweichung (ΔB_{ti}) zur Ausgabe an die den Laser (30) ansteuernde Laseranregungseinheit (20) ermittelt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Signale (Sa, Sm) des Abstandssensors (51) und/oder des Strahlungssensors (52) während der Ausgabe eines Laserpulses (L_{pi}) erfaßt werden und Steuerpulse (Pa.w.p) für mindestens einen dem Laserpuls (L_{pi}) nachfolgenden Laserpuls (L_{pi+n}) ermittelt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1 — 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Ist-Abstand (A_{ist}) oder ein entsprechendes Signal (Sa) und/oder die Bearbeitungstiefe ($B_{t_{ist}}$) oder ein entsprechendes Signal (Sm) über mehrere Laserpulse (Lp) erfaßt und anschließend gemittelt werden.

5. Verfahren nach Anspruch 1 — 4, dadurch gekennzeichnet, daß zu Beginn der Bearbeitung dem ersten Steuerpuls (Pa.w.p₁) eine Pulsweite, -amplitude und -pause vorgegeben wird (Schritt 102).

6. Verfahren nach Anspruch 1 — 5, dadurch gekennzeichnet, daß am Anfang einer neuen Abtragschicht K der Soll-Abstand ($A_{soll\ k-1}$) der vorhergehenden Abtragschicht k-1 mit dem gemessenen Ist-Abstand ($A_{ist\ k}$) der jetzigen Abtragschicht verglichen wird, daß daraus eine Abstandsdifferenz (ΔA_k) ermittelt wird (Schritte 105 — 108) und daß die Steuerpulse (Pa.w.p) entsprechend der Abstandsdifferenz (ΔA_k) korrigiert werden (Schritte 111, 114, 117).

7. Verfahren nach Anspruch 1 — 6, dadurch gekennzeichnet, daß n-te Ableitungen der Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i) und/oder der Bearbeitungstiefenabweichung (ΔB_{ti}) zur Ermittlung der Steuerpulse (Pa.w.p) gebildet werden.

8. Verfahren nach Anspruch 1 — 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuerpulse (Pa.w.p) aus mindestens der Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i), der Bearbeitungstiefenabweichung (ΔB_{ti}) oder der Abstandsdifferenz (ΔA_k) berechnet oder aus einer Matrix mit mindestens der Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i), der Bearbeitungstiefenabweichung (ΔB_{ti}) oder der Abstandsdifferenz (ΔA_k) als Dimensionen ausgelesen werden.

9. Verfahren nach Anspruch 1 — 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuerpulse (Pa.w.p) aus einem amplitudenmodulierten Anteil (Pa), einem pulsweitenmodulierten Anteil (Pw) und/oder einem frequenzmodulierten Anteil (Pp) bestehen, die durch Inkrementierung oder Dekrementierung geändert werden (Schritte 215, 219, 223).

10. Verfahren nach Anspruch 1 — 6, dadurch gekennzeichnet, daß zur Minimierung der Ansprechzeit der Laserstrahlung jedem Steuerpuls (Pa.w.p) ein Vorimpuls (Pv) aufgeschaltet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 1 — 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Laser (30) durch Simmern in einem angeregten Zustand unterhalb der Laser-

schwelle gehalten wird, wenn der Laser (30) länger als einen vorbestimmten Zeitraum deaktiviert ist.

12. Vorrichtung zum Bearbeiten von Werkstücken mittels der von einem Laser (30) emittierten Laserstrahlung, mit

— einer Meßeinrichtung (50) zum Erfassen von Prozeßgrößen,

— einer Laseranregungseinheit (20) zur Ansteuerung des Lasers (30), und

— einer Steuereinheit (10) mit jeweils mindestens einer CPU (11), einem Speicher (12) mit einem RAM und einem ROM, einem Daten- und Adreßbus (13), einem A/D-Wandler (14) und einer I/O-Einheit (15) zur Verarbeitung von Meßsignalen (Sa, Sm) der Meßeinrichtung (50) und Steuerung der Strahlungsleistung des Lasers (30), dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeinrichtung (50) einen Abstandssensor (52) und die Steuereinheit (10)

A) elektronische Schaltkreise aufweist, zum Ermitteln eines Ist-Abstands (A_{ist}) über das Signal (Sa) des Abstandssensors (52), wobei der Ist-Abstand (A_{ist}) dem Abstand zwischen einem Bezugspunkt (44) und der Oberfläche (45) der Bearbeitungsstelle (40) entspricht,

B) elektronische Schaltkreise aufweist, zum Ermitteln (Schritt 109) einer Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i) zwischen einem vorgegebenen Soll-Abstand (A_{soll}) und dem ermittelten Ist-Abstand (A_{ist}),

C) elektronische Schaltkreise aufweist, zum Ermitteln (Schritte 110 — 118) von amplituden-, pulsweiten- und/oder frequenzmodulierten Steuerpulsen (Pa.w.p) entsprechend der Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i),

D) elektronische Schaltkreise aufweist, zum Ausgeben der ermittelten Steuerpulse (Pa.w.p) an die Laseranregungseinheit (20), und

E) elektronische Schaltkreise aufweist, zum Ausgeben von den Steuerpulsen (Pa.w.p) entsprechenden Laserpulsen (Lp) durch den durch die Laseranregungseinheit (20) angesteuerten Laser (30), zum Bearbeiten des Werkstücks (41).

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeinrichtung (50) einen Strahlungssensor (52) aufweist.

14. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuereinheit (10)

— elektronische Schaltkreise aufweist, zum Erfassen der Prozeßstrahlung der Bearbeitungsstelle (40) über das Signal (Sm) des Strahlungssensors (52) und Ermitteln einer dem Abstand zwischen der Oberfläche (45) der Bearbeitungsstelle (40) und der Bodenlinie (46) entsprechenden Bearbeitungstiefe ($B_{t_{ist}}$) (Schritt 205) aus dem Signal (Sm),

— elektronische Schaltkreise aufweist, zum Ermitteln einer Bearbeitungstiefenabweichung (ΔB_{ti}) aus der Bearbeitungstiefe ($B_{t_{ist}}$) und der Soll-/Istwertabweichung (ΔA_i) (Schritt 207) und

— elektronische Schaltkreise aufweist, zum Ermitteln von Steuerpulsen (Pa.w.p) entsprechend der Bearbeitungstiefenabweichung (ΔB_{ti}), zur Ausgabe an die den Laser (30) ansteuernde Laseranregungseinheit (20).

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

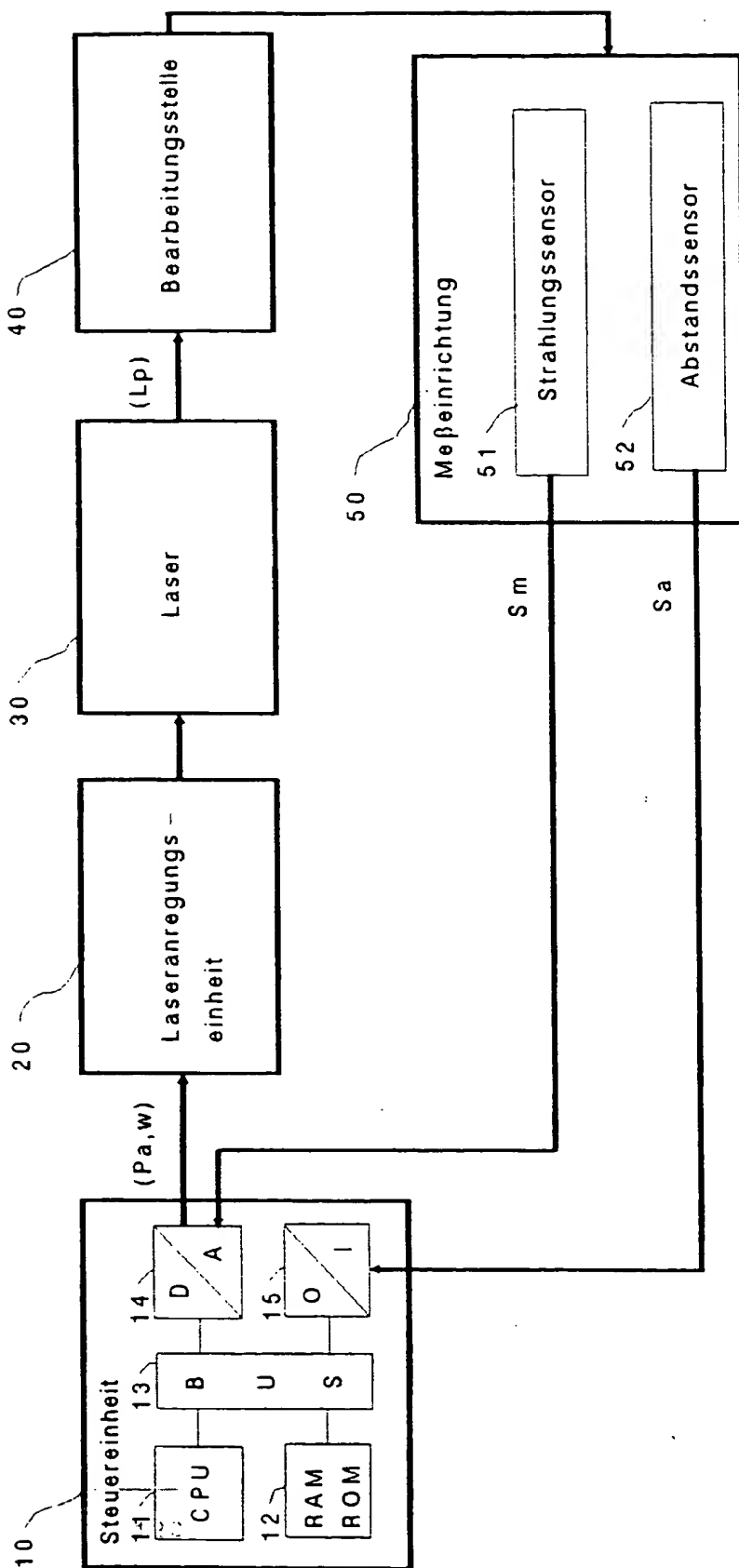
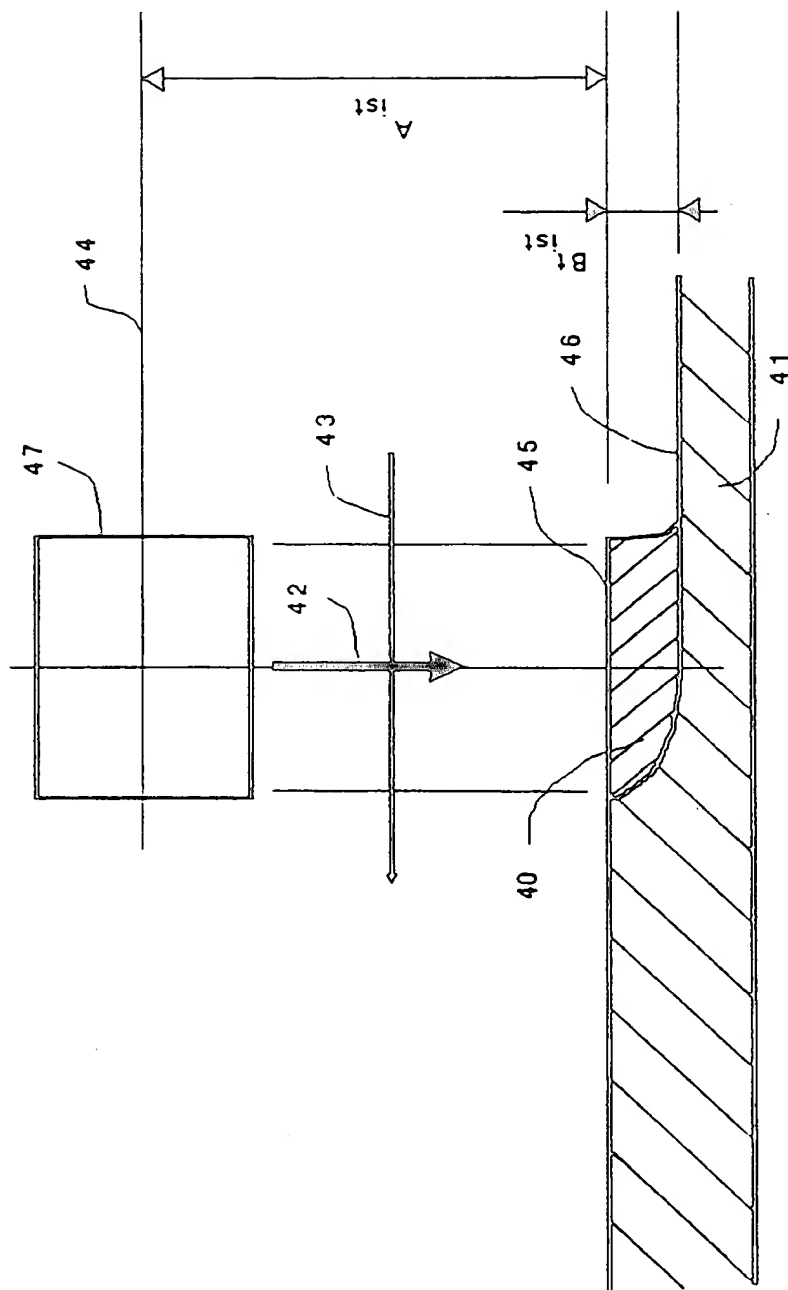


Fig. 1

Fig. 2



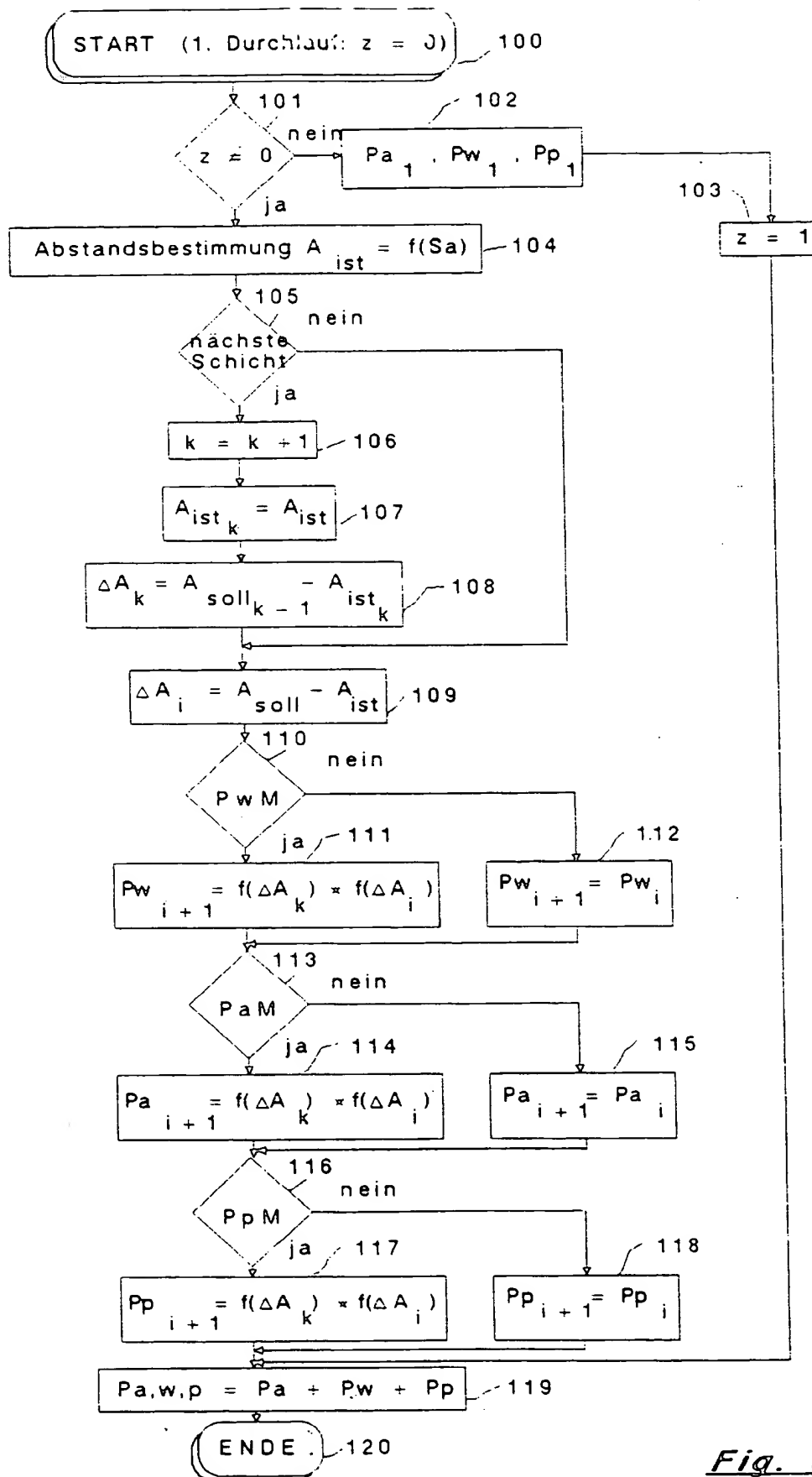


Fig. 3

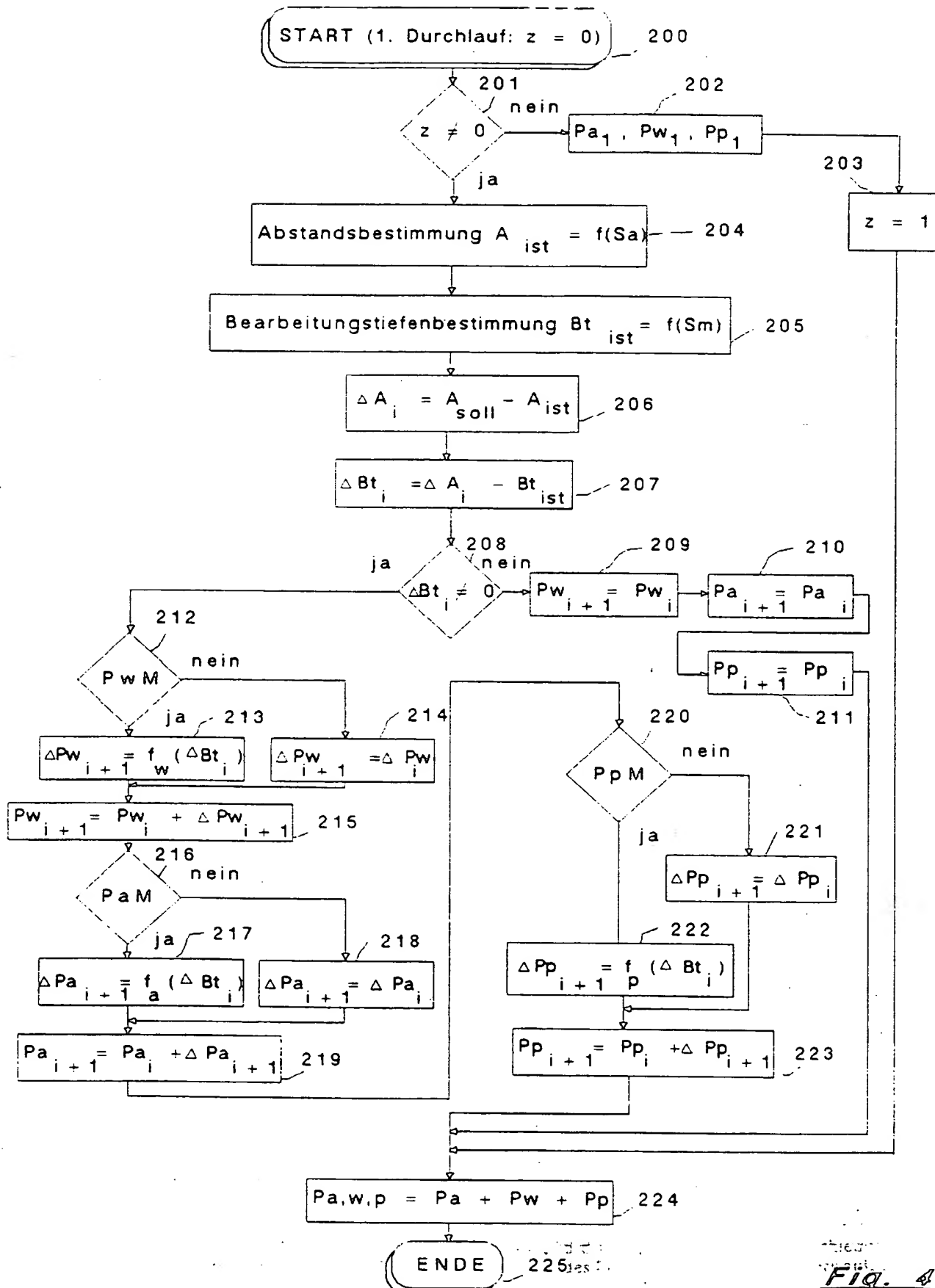


Fig. 4

Fig. 5

